

3.04.02 - Engenharia Elétrica / Medidas Elétricas, Magnéticas e Eletrônicas, Instrumentação.

## DETERMINAÇÃO DA PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA DE MATERIAIS UTILIZANDO ANÉIS RESSOADORES.

Matheus Andrade Santana<sup>1</sup>, Edson Tafeli Carneiro dos Santos<sup>2</sup>

1. Estudante da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

2. Professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) - Orientador

### Resumo

Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de anéis ressoadores para determinação da permissividade elétrica relativa de materiais. São desenvolvidos dois ressoadores com geometria anelar e um ressoador com nova geometria, cuja modelagem é realizada com o objetivo de reduzir o tamanho do patch. São realizadas simulações com diferentes ângulos e porcentagens de acoplamento para definir um parâmetro ótimo de acoplamento e reduzir a perda de inserção nos picos de ressonância. O modelo proposto baseia-se em um polígono e apresenta uma redução de 36% no raio médio em comparação com o ressoador de geometria circular tradicional para as mesmas frequências. Para comprovar a precisão do método são realizadas simulações utilizando o software CST Studio com dois materiais dielétricos e os resultados são comparados com valores existentes na literatura e entre si. Os valores de permissividade efetiva e relativa encontrados mostram-se próximos entre os três ressoadores modelados.

**Palavras-chave:** Permissividade elétrica; Materiais dielétricos; Ressonadores de microfita.

**Apoio financeiro:** PIBIC.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UPM.

### Introdução

A determinação do coeficiente de permissividade elétrica relativa de materiais é de extrema importância para a caracterização destes, sendo, portanto, uma informação imprescindível para sua aplicação em vários campos como na indústria alimentícia, controle de qualidade, agricultura, medicina (ALAHNOMI, Rammah A. et al., 2016).

A técnica de medição a partir de sensores tem sido muito utilizada nos últimos anos por ser um método de baixo custo, compacto, não invasivo, portátil e devido a facilidade na preparação da amostra (ALAHNOMI, Rammah A. et al., 2016). Contudo, o anel ressoador utilizado para determinar o coeficiente de permissividade elétrica relativa com o leiaute tradicional, geometria anelar, tem o tamanho do seu raio como uma função inversa da frequência do material a ser medido, ou seja, quanto menor a frequência a ser trabalhada, maior terá que ser o raio do anel. Em determinadas frequências, abaixo de 1 GHz, o raio do anel ressonador adquire tamanhos desnecessariamente grandes, o que dificulta a medição, pois o material a ser caracterizado terá que ser colocado sobre toda a dimensão do anel (MAZZARO et al., 2012). Isso o torna pouco viável de trabalhar em baixas frequências.

Todavia, medições em frequências mais altas, acima de 1 GHz, necessitam de equipamentos mais caros e sofisticados para serem realizadas. Assim, o desenvolvimento de novas geometrias para o anel ressoador tem grande utilidade em pesquisas que necessitem medir materiais em baixas frequências, para que se possa obter uma maior precisão e facilidade na determinação do coeficiente de permissividade elétrica relativa e, conseqüentemente, que o material tenha suas características e informações bem definidas para sua correta incorporação em projetos e equipamentos, além de tornar mais viável o estudo desses materiais em laboratório.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho são: realizar a modelagem eletromagnética de anéis ressoadores utilizando novas geométricas, simular a resposta dos ressoadores para medir a permissividade de materiais dielétricos e verificar sua funcionalidade e precisão comparando os resultados obtidos com valores encontrados na literatura e obtidos utilizando anéis com geometria tradicional circular.

### Metodologia

A metodologia adotada nesse trabalho pode ser classificada quanto a sua natureza como uma pesquisa aplicada, pois objetiva solucionar problemas específicos relacionados a caracterização de materiais dielétricos; ao mesmo tempo admite uma abordagem quantitativa, pois os dados obtidos são analisados quantitativamente; com objetivos explicativos dada a natureza experimental do trabalho e, do ponto de vista do procedimento técnico, possui a característica de uma pesquisa bibliográfica e experimental (SILVA; MENEZES, 2005).

A pesquisa bibliográfica abrangeu o uso da plataforma de divulgação de artigos do IEEE e dos livros disponíveis na biblioteca da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM). Os ressoadores são modelados e simulados no software de simulação eletromagnética 3D CST Microwave Studio.

Para o cálculo da permissividade efetiva do dielétrico ( $\epsilon_{eff}$ ) e dimensionamento dos parâmetros do ressoador com geometria tradicional é utilizado o software desenvolvido por alunos da Faculdade de Engenharia Elétrica e Informática de Košice (ROVENSKY et al, 2015), considerando, para efeitos de comparação, a

frequência de ressonância de 800 MHz para todos os ressoadores projetados. Com o intuito de reduzir a perda de inserção são realizadas simulações com um segundo ressoador circular aumentando o ângulo de acoplamento entre as linhas de transmissão e o anel.

A geometria projetada baseia-se em um polígono de  $n$  lados, como ilustrado na Figura 1, neste projeto admite-se  $n=20$  (icoságono). Cada aresta do polígono representa o diâmetro de uma semicircunferência. O comprimento total é dado pela soma do comprimento das 20 semicircunferências que formarão o ressoador.

Figura 1 - Geometria considerada para modelagem do ressoador.



Fonte: Autoria própria (2020).

Novamente, com o propósito de reduzir a perda de inserção do ressoador com nova geometria projetado, são realizadas simulações variando o comprimento do acoplamento. Neste caso, devido a geometria é considerada a porcentagem de acoplamento, que se refere à razão do comprimento do acoplamento pelo comprimento  $L$  do ressoador.

São utilizados dois materiais diferentes para as simulações, são eles: ar e porcelana. Para realizar as simulações é necessário posicionar o material a ser caracterizado sobre o loop fechado do ressoador, não sendo necessário cobrir as linhas de transmissão. Com a resposta em frequência obtida, calculam-se a permissividade efetiva ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ), relativa ( $\epsilon_r$ ), fator de qualidade ( $Q_1$ ) e tangente de perdas ( $\tan \delta$ ) dos materiais através das equações (1), (2), (3), (4), (5) e (6).

$$L = \frac{n \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-0.5} \quad (2)$$

$$BW_{3\text{dB}} = f_2 - f_1 \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{f_0}{BW_{3\text{dB}}} \quad (4)$$

$$Q_0 = \frac{Q_1}{(1 - 10^{-L/20})} \quad (5)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \quad (6)$$

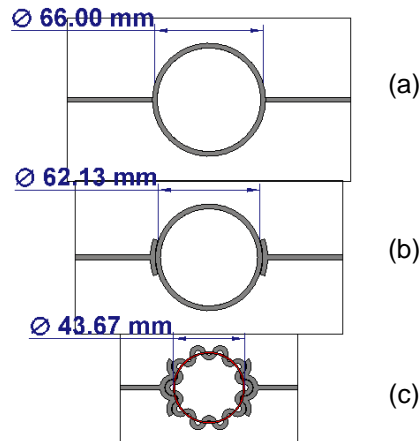
## Resultados e Discussão

As simulações variando o comprimento do acoplamento dos ressoadores mostraram que com o aumento do acoplamento há uma menor perda de inserção e um maior desvio nas frequências de ressonância. Dessa forma, para se otimizar os comprimentos do acoplamento para uma melhor resposta, é realizada uma análise de perda de inserção por desvio de frequência.

Respeitando esse parâmetro de comparação, o acoplamento com ângulo de  $36,5^\circ$  tem a melhor resposta em frequência para o ressoador com geometria circular e a porcentagem de acoplamento de 20% para o modelo com a nova geometria.

Considerando os raios médios dos modelos construídos, o modelo com nova geometria apresenta uma redução da área média de aproximadamente 36% em relação ao modelo com geometria anelar sem acoplamento e de 32% em comparação com o que possui acoplamento. A diferença de tamanho das placas pode ser observada na Figura 2.

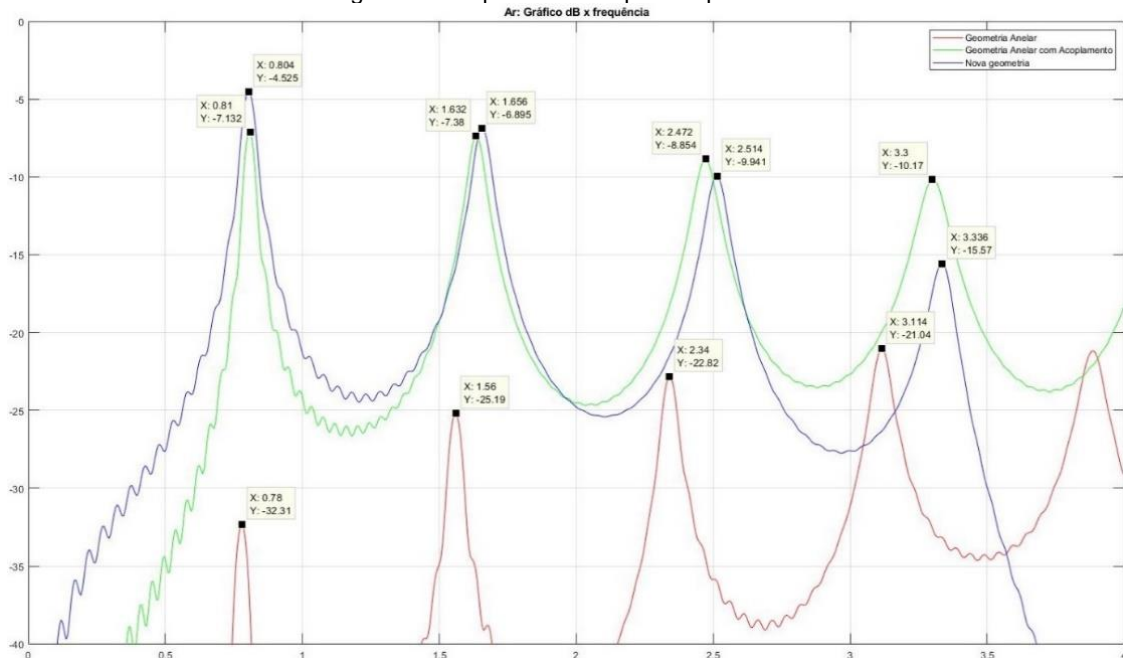
Figura 2 - Comparação do tamanho dos ressoadores projetados para a mesma frequência.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 3 é exibida uma das respostas em frequência obtidas com os três ressoadores.

Figura 3 - Resposta em frequência para o ar.



Fonte: Autoria própria (2020).

Com estes dados é possível calcular e caracterizar a permissividade efetiva e relativa, o fator de qualidade e a tangente de perdas do material. A permissividade relativa teórica para o ar é de 4,3 e de 6 para a porcelana. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos com cada ressoador para o ar e porcelana.

Tabela 1 - Resultados obtidos com os três ressoadores para o ar e porcelana.

	GEOMETRIA CIRCULAR						GEOMETRIA CIRCULAR COM ACOPLAMENTO					NOVA GEOMETRIA				
	N	Fc (MHz)	εeff	εr	QI	Tan (δ)	Fc (MHz)	εeff	εr	QI	Tan (δ)	Fc (MHz)	εeff	εr	QI	Tan (δ)
AR	1	780	3,44	4,55	17,3	1,40E-03	810	3,6	4,78	18,01	2,44E-02	804	3	3,91	14,13	4,20E-02
	2	1560	3,44	4,55	30,21	1,82E-03	1638	3,52	4,67	23,43	1,83E-02	1656	2,83	3,66	22,5	2,01E-02
	3	2340	3,44	4,55	37,81	1,91E-03	2472	3,48	4,61	26,68	1,35E-02	2514	2,76	3,56	29,82	1,07E-02
	4	3114	3,45	4,57	32,93	2,69E-03	3300	3,47	4,59	28,28	1,10E-02	3336	2,79	3,6	36,7	4,54E-03
	MÉDIA		3,4425	4,56	-	1,96E-03		3,5175	4,66	-	1,68E-02		2,845	3,68	-	1,93E-02
	VARIÂNCIA			0,0001					0,0055					0,0185		
DESVIO PADRÃO			0,0087					0,0854					0,1361			
ERRO (%)			6%					8%					14%			
PORCELANA	1	648	4,99	6,8	20,73	6,53E-03	666	5,33	7,29	13,29	5,35E-02	684	4,14	5,57	9,98	7,97E-02
	2	1302	4,94	6,73	34,54	7,10E-03	1362	5,09	6,96	17,98	3,67E-02	1404	3,93	5,27	19,18	3,18E-02
	3	1950	4,95	6,75	40,54	7,10E-03	2064	4,99	6,81	2814	2,09E-02	2106	3,93	5,27	32,88	1,12E-02
	4	2598	4,96	6,76	34,09	7,70E-03	2772	4,92	6,7	31,52	1,52E-02	SATURADO				
	MÉDIA		4,96	6,76	-	7,11E-03		5,0825	6,94	-	3,15E-02		4,00	5,37	-	4,09E-02
	VARIÂNCIA			0,0006					0,0494					0,0200		
DESVIO PADRÃO			0,0255					0,2221					0,1414			
ERRO (%)			13%					16%					11%			

Fonte: Autoria própria (2020).

Com os resultados obtidos para o ar, mostra-se uma maior precisão dos ressoadores com geometria circular com relação à nova geometria desenvolvida. Além disso, pode-se perceber que os valores com menor erro tiveram um menor desvio padrão nas medidas coletadas.

Com relação aos resultados obtidos para a porcelana, é possível perceber uma saturação na quarta ressonância do ressoador com a nova geometria, o que significa que só houve ressonância até a terceira frequência de ressonância. Para este material, os erros obtidos são maiores e a geometria desenvolvida mostra-se mais precisa que os ressoadores tradicionais se comparado com o valor teórico da permissividade. Além disso, pode-se observar que em ambas medidas, o desvio padrão do ressoador com geometria circular é menor que os outros ressoadores, o que indica uma maior consistência nos resultados obtidos com ele.

Considerando essas medidas, pode-se calcular o erro médio para cada ressoador. O ressoador com geometria circular teve um erro médio de 9,3%, o ressoador com geometria circular e acoplamento 12,0% e o ressoador com nova geometria 12,4%. Dessa forma, percebe-se que os erros médios dos três ressoadores são próximos, sobretudo entre o ressoador circular com acoplamento e o ressoador com a nova geometria proposta.

As diferenças existentes entre as permissividades relativas e efetivas encontradas por cada ressoador é explicada pelo deslocamento de frequência causado tanto pelos materiais, quanto pelos acoplamentos entre os gaps, pois ambos os modelos com maiores erros possuem acoplamentos enquanto o ressoador com melhor resultado não possui.

### Conclusões

Com os resultados obtidos com este trabalho, pode-se comprovar a eficiência da geometria de ressoador desenvolvida para determinar a permissividade relativa de um material dielétrico. Além do novo modelo desenvolvido, foram modelados dois modelos de referência, cuja precisão para este tipo de medida é conhecida na literatura.

Além da geometria projetada, foi realizada uma análise envolvendo a relação entre comprimento do acoplamento entre os gaps e a resposta em frequência, o que mostrou ser uma troca entre menor perda de inserção e maior deslocamento nas frequências de ressonância.

Dessa forma, a nova geometria desenvolvida apresentou resultados satisfatórios ao apresentar valores próximos aos de referência e possibilitar uma redução de mais de 30% do raio médio do ressoador, fato este que possibilita a utilização do mesmo para pesquisas em menores frequências em comparação ao ressoador com geometria circular utilizado na literatura.

### Referências bibliográficas

ALAHNOMI, Rammah A. et al. A NOVEL MICROWAVE SENSOR WITH HIGH-Q SYMMETRICAL SPLIT RING RESONATOR FOR MATERIAL PROPERTIES MEASUREMENT. **Jurnal Teknologi**, [s. L.], v. 78, n. 10-3, p.37-42, ago. 2016.

MAZZARO, Gregory et al. **Portable Ring-Resonator Permittivity Measurement System: Design & Operation**. Adelphi Md: U.s. Army Research Laboratory, 2012. 54 p. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/279621694\\_Portable\\_Ring-Resonator\\_Permittivity\\_Measurement\\_System\\_Design\\_Operation](https://www.researchgate.net/publication/279621694_Portable_Ring-Resonator_Permittivity_Measurement_System_Design_Operation)>. Acesso em: 25 mar. 2017.

ROVENSKY, T. et al. **Microstrip methods for measurement of dielectric properties in High Frequency area**. Electronics Technology (IS-SE), 2015 38th International Spring Seminar on, vol., no., pp.188-191, 6-10 May 2015 doi: 10.1109/ISSE.2015.7247987

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. A Pesquisa e suas Classificações. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Cap. 2. p. 19-23.